

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.25>

УДК: 629.7.058.43

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ПОД ВОДОЙ

И.Б. Широков, Е.И. Широкова, Н.А. Косарев

Севастопольский государственный университет,
299053, Севастополь, Университетская, 33

Статья поступила в редакцию 7 октября 2025 г.

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы улучшения эксплуатационных характеристик системы измерения дальности под водой. Предлагается для организации работы фазовой системы измерения дальности использовать одновременно два принципиально различных волновых процесса излучения и приема колебаний, формируя тем самым два рабочих канала системы. Один канал – опорный, в котором излучаются и принимаются электромагнитные колебания. Другой канал – информационный, в котором излучаются и принимаются гидроакустические колебания. При этом предлагается осуществлять излучение и прием гидроакустических сигналов на рабочей частоте акустических преобразователей ультразвукового диапазона. При этом ультразвуковые сигналы предлагается модулировать информационными сигналами звукового диапазона длин волн. Данный подход позволяет существенно уменьшить массогабаритные показатели элементов системы измерения дальности. Кроме того, использование модулированных колебаний обеспечивает устранение дополнительных ошибок определения дальности, возникающих за счет резонансной природы самих акустических преобразователей, которые неизбежно возникают при работе фазовой системы

измерения дальности. Проведено моделирование работы системы в среде MatLab, которое показало полное устранение дополнительных ошибок измерения разности фаз, возникающих в диапазоне ультразвуковых частот. Приведены рабочие графики, непосредственно взятые из среды моделирования. Из графиков видно, что любые изменения фазы ультразвуковых колебаний, обусловленные как распространением самих колебаний в воде, так и за счет резонансной природы акустических преобразователей, полностью подавляются в процессе демодуляции на приемной стороне. Экспериментальный макет приемника модулированных колебаний был изготовлен и испытан. Приведена рабочая схема приемника гидроакустического канала. Работа гидроакустического приемника системы измерения дальности проверена экспериментально. Результаты экспериментальных исследований полностью совпадают с результатами моделирования. Сделаны выводы по работе.

Ключевые слова: акустические преобразователи, система измерения дальности под водой, модуляция сигналов, демодуляция сигналов, измерение разности фаз.

Финансирование: Данная работа была выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект 24-29-20009.

Автор для переписки: Широков Игорь Борисович, shirokov@ieee.org

Введение

В мире наблюдается тенденция к роботизации технических средств, используемых человеком для решения различных задач. Учитывая все сложности и опасности работы в водной среде, такая тенденция является наиболее актуальной. Для выполнения различных задач в подводной среде и различных подводно-технических работ все чаще используются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), функционирующие в автоматическом режиме практически без участия человека. Это обследование и контроль гидротехнических сооружений, который зачастую приходится проводить в режиме 24/7/365. Подводная робототехника активно используется в

гражданском флоте для решения таких задач, как картографирование морского дна, наблюдение и диагностика подводных коммуникаций (трубопроводы, сети передачи данных), транспорт материалов к местам выполнения подводных работ, подводная археология, разведение аквакультур и др. [1-6].

При использовании АНПА необходимо обеспечить их позиционирование в локальной системе координат. Позиционирование обеспечивает работу АНПА в полностью автоматическом режиме. При этом наиболее важной задачей в деле позиционирования АНПА является измерение дальности. В работах авторов ранее предлагается одновременно использовать два принципиально различных волновых процесса распространения колебаний для создания фазовой радиотехнической системы измерения дальности под водой [7-9]. При этом в фазовой радиотехнической системе измерения дальности опорным является электромагнитный или оптический канал, а информационным является гидроакустический канал. При этом обеспечивается измерение основного информационного параметра – дальности с наивысшей точностью, что присуще любой фазовой радиотехнической системе.

Согласно этому подходу к измерению дальности в измерительной станции первоначально генерируют непрерывные колебания с известной фиксированной частотой F_1 . При этом непрерывные колебания подают одновременно на вход передающей рамочной магнитной антенны и на вход передающего акустического преобразователя, оба из которых располагают на одном конце измерительной трассы. Таким образом, излучают в направлении объекта, расстояние до которого необходимо измерить, одновременно переменное магнитное поле и акустическую волну. На другом конце измерительной трассы переменное магнитное поле улавливают приемной рамочной магнитной антенной, а акустическую волну улавливают приемным акустическим преобразователем, оба из которых располагают на другом конце измерительной трассы. При этом измеряют и фиксируют разность фаз $\Delta\varphi_{m1}$ между непрерывными колебаниями, формируемыми на выходе приемной рамочной магнитной антенны и на выходе приемного акустического преобразователя.

После чего генерируют непрерывные колебания с известной фиксированной частотой F_2 и повторяют всю процедуру излучения, приема переменного магнитного поля и акустической волны, а также измеряют и фиксируют разность фаз $\Delta\varphi_{m2}$ между непрерывными колебаниями, формируемыми на выходе приемной рамочной магнитной антенны и на выходе приемного акустического преобразователя. При этом определяют разность фаз $\Delta\varphi = \Delta\varphi_{m1} - \Delta\varphi_{m2}$, при этом расстояние между передающим акустическим преобразователем и приемным акустическим преобразователем определяют по формуле:

$$D = \frac{\Delta\varphi c_a}{2\pi(F_1 - F_2)}, \quad (1)$$

где c_a – скорость звука в среде распространения.

Однако указанный подход к измерению дальности обладает рядом существенных недостатков. В частности, для измерения дальности предполагается излучение низкочастотных акустических колебаний звукового диапазона частот. При этом габариты и масса акустических преобразователей определяются частотой излучения и для частоты, например, в 1 кГц должны исчисляться десятками сантиметров и десятками килограммов соответственно, что накладывает определенные ограничения на установку указанного акустического преобразователя на определенные классы объектов, дальность которых необходимо измерить. Кроме того, любой акустический преобразователь обладает резонансными характеристиками, притом, что эффективность излучения (приема) акустического преобразователя резко повышается именно на его резонансной частоте. В тоже время, вблизи резонанса акустического преобразователя наблюдается сильная зависимость его фазовой характеристики от частоты, что является дополнительным источником погрешности измерения дальности, осуществляемой фазовым методом (см. формулу (1)).

Целью исследований является снижение массогабаритных показателей системы измерения дальности и снижения ошибок измерения дальности, обусловленных резонансной природой акустических преобразователей.

1. Новый подход к проблеме измерения дальности

Предлагается в гидроакустическом канале использовать колебания ультразвукового диапазона длин волн, модулированные низкочастотными информационными колебаниями звукового диапазона длин волн. Схема измерения дальности показана на Рис. 1.

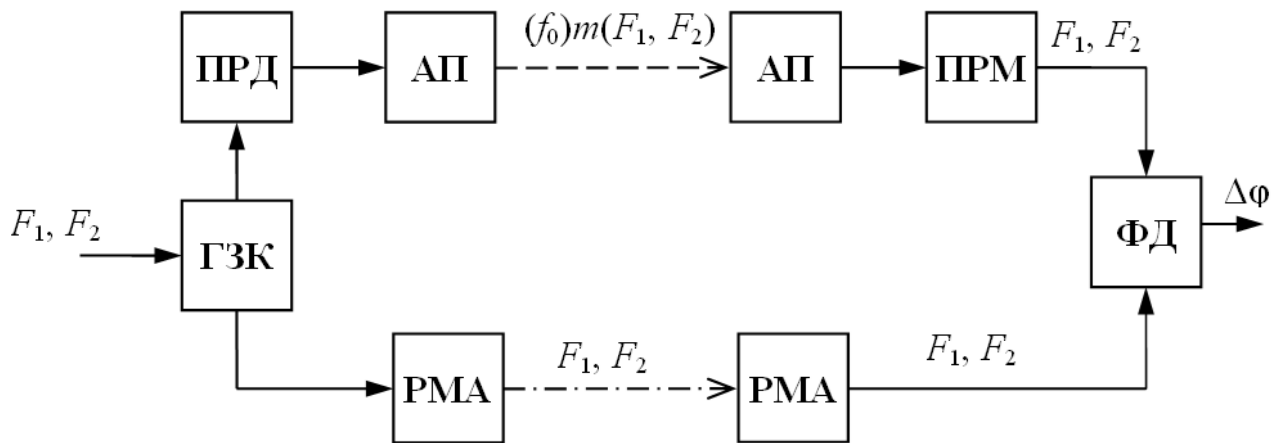


Рис. 1. Схема измерения дальности.

Система состоит из генератора звуковых колебаний (ГЗК), передающей и приемной рамочных магнитных антенн (РМА), передатчика колебаний ультразвуковых частот с входом модуляции (ПРД), передающего и приемного ультразвуковых акустических преобразователей (АП), приемника колебаний ультразвуковых частот (ПРМ) с выходом демодуляции, измерителя разности фаз (ФД). Работает система измерения дальности следующим образом.

С помощью генератора непрерывных низкочастотных колебаний первоначально генерируют непрерывные колебания с известной частотой F_1 , начальной фазой φ_{01} и амплитудой U_0

$$u_1(t) = U_0 \sin(2\pi F_1 t + \varphi_{01}). \quad (2)$$

Частота этих колебаний выбирается невысокой. Значение частоты этих колебаний лежит в звуковом диапазоне длин волн. Эти колебания подают на вход передающей рамочной магнитной антенны и одновременно на вход модуляции передатчика ультразвуковых модулированных колебаний.

С помощью передающей рамочной магнитной антенны излучают в направлении другого конца измерительной трассы электромагнитную волну. Поскольку длина волны электромагнитных колебаний намного больше измеряемой дальности D , то набегом фазы электромагнитных колебаний можно пренебречь. Можно утверждать, что непрерывные колебания, формируемые на выходе приемной рамочной магнитной антенны, являются синфазными, по отношению к непрерывным колебаниям, поступающим на вход передающей рамочной магнитной антенны, и описываются одним и тем же выражением (2). Непрерывные колебания на входе передающей и на выходе приемной рамочных магнитных антенн всегда будут синфазны или противофазны (в зависимости от их взаимной ориентации), как это имеет место в случае использования двух катушек индуктивностей.

С другой стороны, сигнал с выхода генератора звуковых колебаний подают на вход модуляции передатчика ультразвуковых модулированных колебаний. На выходе передатчика ультразвуковых модулированных колебаний получают ультразвуковые колебания с частотой f_0 , модулированные звуковыми колебаниями с частотой F_1 . Условно это действие можно выразить как $(f_0)m(F_1)$.

Далее с помощью передающего акустического преобразователя излучают в направлении другого конца измерительной трассы акустическую волну ультразвуковых колебаний с частотой f_0 , модулированных звуковыми колебаниями с частотой F_1 . Акустическая волна с ультразвуковой частотой f_0 при распространении на расстояние D от передающего акустического преобразователя до приемного акустического преобразователя получает набег фазы $\varphi_{11} = 2\pi f_0 D / c_a$, где c_a – скорость звука в среде распространения. Однако набег фазы акустической волны ультразвуковых колебаний не имеет значения, поскольку этот набег фазы пропадает в процессе демодуляции принятых модулированных ультразвуковых колебаний в приемнике ультразвуковых модулированных колебаний. Там же нивелируется изменение фазы

ультразвуковых колебаний, обусловленное резонансной природой акустических преобразователей.

Вместе с тем, на выходе приемника ультразвуковых модулированных колебаний формируется сигнал звукового диапазона с частотой F_1 , который условно можно описать следующим выражением:

$$u_2(t) = U_0 A_1 \sin \left(2\pi F_1 + \varphi_{01} + \frac{2\pi F_1}{c_a} D \right). \quad (3)$$

Другими словами, данное действие можно представить как распространение гипотетической звуковой волны с частотой F_1 , которая получает свой набег фазы $\varphi_{12} = 2\pi F_1 D / c_a$. Значением этого набег фазы пренебречь нельзя, поскольку его величина может достигать нескольких тысяч фазовых циклов величиной 2π каждый.

Непрерывные колебания с выхода приемной рамочной магнитной антенны, описываемые выражением (2) и с выхода приемника ультразвуковых модулированных колебаний, описываемые выражением (3), подают на входы измерителя разности фаз, на выходе которого формируют сигнал, пропорциональный разности фаз сигналов (2) и (3). Однако измеритель разности фаз способен адекватно отобразить измеряемую разность фаз, если величина этой разности фаз лежит в пределах от 0 до 2π . Другими словами измеритель разности фаз формирует сигнал, пропорциональный некоторой величине $\Delta\varphi_{m1}$, которая связана с реальным набегом фазы φ_{12} соотношением

$$\Delta\varphi_{m1} = \varphi_{12} - n \cdot 2\pi = \frac{2\pi F_1}{c_a} D - n \cdot 2\pi,$$

где n – некоторое целое число, которое может достигать нескольких тысяч и более.

Для решения этой проблемы указанное измеренное значение $\Delta\varphi_{m1}$ фиксируют, после чего изменяют значение частоты непрерывных колебаний до некоторой известной величины F_2 и повторяют всю процедуру излучения и приема переменного магнитного поля, модуляции ультразвуковых колебаний

звуковыми колебаниями, излучение и прием ультразвуковых акустических колебаний, модулированных звуковыми колебаниями, демодуляции ультразвуковых акустических колебаний, модулированных звуковыми колебаниями, после чего вновь измеряют разность фаз $\Delta\varphi_{m2}$ непрерывных колебаний на выходе приемной рамочной магнитной антенны и выходе приемника ультразвуковых модулированных колебаний, которую вновь фиксируют. После чего определяют разность фаз $\Delta\varphi = \Delta\varphi_{m1} - \Delta\varphi_{m2}$ и вычисляют дальность по формуле (1). Важно при этом помнить, что изменение частоты $(F_1 - F_2)$ не должно приводить к изменению разности фаз сигналов на величину бóльшую, чем 2π . Другими словами

$$(F_1 - F_2) \leq \frac{c_a}{D}.$$

2. Моделирование работы акустического канала в MatLab

Листинг рабочего файла в программе MatLab приведен ниже.

```
F = 1000;           % Частота модулирующего сигнала
f = 30000;          % Частота несущего сигнала
U = 1;              % Амплитуда
M = 0.5;            % Коэф. модуляции
c = 1480;           % Скорость распространения
d = 100;            % Расстояние
delta_t = d/c;
% Вектор времени
fs = 20*f;          % Частота дискретизации
t = 0:1/fs:0.003;
d_range = linspace(0, 100, 1000); % массив расстояний
signal_1kHz = U * cos(2*pi*F*t);
signal_30kHz = U * cos(2*pi*f*t);
% АМ сигнал 50 %
u = U * (1 + M * cos(2*pi*F*(t - delta_t))) .* cos(2*pi*f*(t - delta_t));
% Выпрямленный сигнал
u_abs = abs(u);
% Преобразование Фурье
N = length(u_abs);
U_fft = fft(u_abs);
freq = (0:N-1)*(fs/N);
% ФНЧ
cutoff_freq = 2000; % Частота среза
j = 1i;
K = 1 ./ (1 + j*(freq/cutoff_freq));
U_filtered = U_fft .* K;
% Обратное преобразование Фурье
fft_U = abs(ifft(U_filtered));
fft_U = fft_U * (max(u_abs)/max(fft_U)); % Нормализация
```

```

% Фазы сигналов от расстояния
psi1 = 2*pi*f*d_range/c;          % Фаза 1 кГц
psi2 = 2*pi*f*d_range/c;          % Фаза 30 кГц
delay = 1/(2*pi*cutoff_freq);     % Задержка фильтра
phase_due_to_filter = -2*pi*f*delay; % фазовый сдвиг под влиянием фильтра
phase_after_filter = psi1 + phase_due_to_filter; % задержка после фильтра
figure('Position', [100, 100, 1400, 1000]);

% График 1: Сигнал исходный 1 кГц
subplot(4, 2, 1);
plot(t*1000, signal_1kHz, 'b', 'LineWidth', 1.5);
title('1. Сигнал модулирующий 1 кГц');
xlabel('Время, мс');
ylabel('Амплитуда');
grid on;
xlim([0, 1.5]);

% График 2: Сигнал исходный 30 кГц
subplot(4, 2, 2);
plot(t*1000, signal_30kHz, 'r', 'LineWidth', 1.5);
title('2. Сигнал несущей 30 кГц');
xlabel('Время, мс');
ylabel('Амплитуда');
grid on;
xlim([0, 1.5]);

% График 3: АМ сигнал 50 %
subplot(4, 2, 3);
plot(t*1000, u, 'm', 'LineWidth', 1.5);
title('3. АМ сигнал 50 % (M = 0.5)');
xlabel('Время, мс');
ylabel('Амплитуда');
grid on;
xlim([0, 3]);

% График 4: Выпрямленный сигнал
subplot(4, 2, 4);
plot(t*1000, u_abs, 'g', 'LineWidth', 1.5);
title('4. Выпрямленный сигнал');
xlabel('Время, мс');
ylabel('Амплитуда');
grid on;
xlim([0, 3]);

% График 5: Отфильтрованный сигнал (огibaющая)
subplot(4, 2, 5);
plot(t*1000, fft_U, 'k', 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(t*1000, u_abs, 'g:', 'LineWidth', 1);
title('5. Отфильтрованный сигнал (огibaющая)');
xlabel('Время, мс');
ylabel('Амплитуда');
legend('Огibaющая', 'Выпрямленный');
grid on;
xlim([0, 3]);
subplot(4, 2, 6);
plot(d_range, psi2, 'r-', 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(d_range, psi1, 'b-', 'LineWidth', 2);
xlabel('Расстояние, м');
ylabel('Фаза, радианы');
legend('30 кГц', '1 кГц');

```

```

grid on;
subplot(4, 2, 7);
plot(d_range, psi1, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '1 кГц до ФНЧ');
hold on;
plot(d_range, phase_after_filter, 'r--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '1 кГц после ФНЧ');
xlabel('Расстояние, м');
ylabel('Фаза, радианы');
title('7. Фаза сигнала 1 кГц до и после ФНЧ');
legend;
grid on;
xlim([0, 1]);
ylim([0, 4])

```

На Рис. 2 показаны результаты моделирования работы акустического канала в среде проектирования MatLab. Исходный сигнал генератора звуковых колебаний показан на Рис. 2а) (кривая синим цветом). Частота исходных колебаний выбрана равной 1 кГц, амплитуда – 1 В (условно). На Рис. 2б) показаны исходные колебания передатчика ультразвуковых колебаний. Частота колебаний выбрана равной 30 кГц, амплитуда – 1 В (кривая красным цветом). Модулированные ультразвуковые колебания колебаниями звуковой частоты показаны на Рис. 2в) (кривая сиреневым цветом). Глубина модуляции выбрана равной 50 %. На Рис. 2г) показаны выпрямленные колебания на выходе приемника ультразвуковых колебаний (используется линейный амплитудный детектор) (кривая зеленым цветом). Видно, что в выходном сигнала присутствуют колебания несущей, огибающая которых повторяет исходный звуковой сигнал.

Для дальнейшего моделирования необходимо было перейти в частотную область, для чего в среде MatLab использовалось преобразование Фурье. Далее сигнал был пропущен через фильтр низких частот первого порядка с частотой среза 2 кГц. Затем снова был осуществлен переход во временную область (в среде проектирования MatLab использовалось обратное преобразование Фурье). Отфильтрованный сигнала показан на Рис. 2д) (кривая черным цветом).

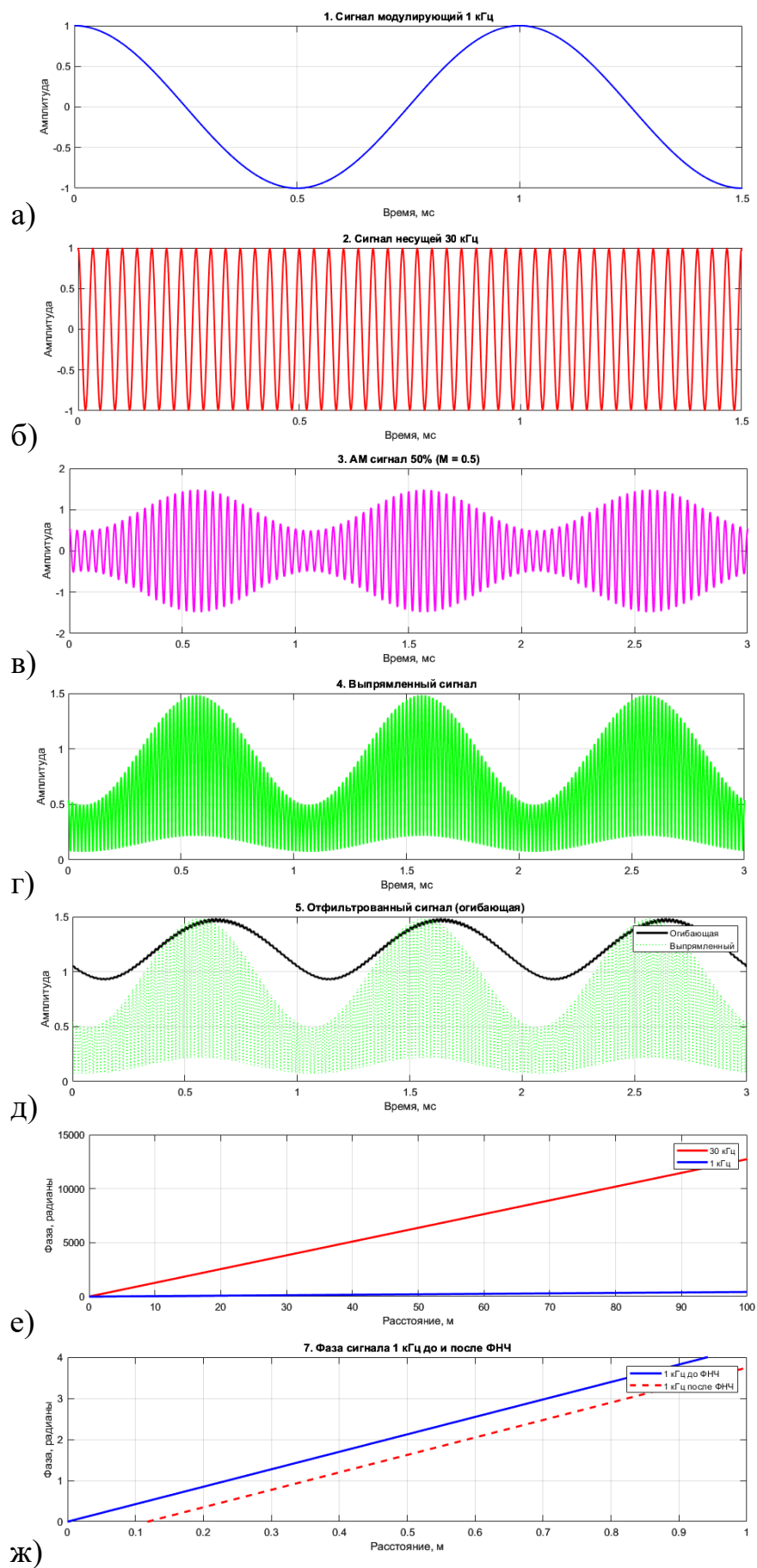


Рис. 2. Результаты моделирования акустического канала в MatLab.

На Рис. 2д) видно, что отфильтрованный сигнал имеет сдвиг по фазе относительно исходного модулирующего сигнала. Сдвиг обусловлен действием известной постоянной времени фильтра нижних частот (ФНЧ).

Далее исследовался фазовый сдвиг всех сигналов, обусловленный распространением модулированных ультразвуковых акустических колебаний в воде. На Рис. 2е) показано изменение сдвига фазы всех сигналов, как ультразвуковых (линия красным), так и звуковых (линия синим), выраженное в радианах, в зависимости от расстояния распространения акустических колебаний. Сдвиг фазы ультразвуковых акустических колебаний частотой 30 кГц достигает величины 13000 радиан на расстоянии 100 м по вполне понятным причинам. Линия синим цветом представляет собой сдвиг фазы гипотетической звуковой волны частотой 1 кГц, распространяющейся в том же канале, что и ультразвуковая волна. По вполне понятным причинам сдвиг фазы гипотетической звуковой волны существенно меньше, чем ультразвуковой. Можно утверждать, что он меньше в 30 раз.

На Рис. 2ж) показано изменение сдвига фазы звуковых сигналов на малом расстоянии (до 1 м) для огибающей после амплитудного детектора (линия синим) и сигнала после ФНЧ (линия красным, прерывистая). Из Рис. 2ж) видно, что разность фаз этих сигналов постоянна и она обусловлено наличием постоянной времени ФНЧ. Здесь же видно, что набег фазы акустического сигнала ультразвуковых частот (сигнала несущей) на трассе распространения ни коим образом не влияет на изменение фазы звукового информационного сигнала. Колебания ультразвуковой несущей подавляются в ФНЧ и вместе с ними подавляется изменение фазы этой несущей за счет распространения. Можно утверждать, что любые изменения фазы сигнала ультразвуковой несущей не влияют на изменение фазы информационного звукового сигнала. Фазо-частотная характеристика акустических преобразователей, обусловленная их природой функционирования, также ни коим образом, по той же причине, не сказывается на изменении фазы информационного звукового сигнала фазовой системы измерения дальности под водой.

На микросхеме DA2A собран входной буфер с коэффициентом передачи равным 1. Его основное назначение – согласовать высокое внутреннее сопротивление акустического преобразователя с относительно низким сопротивлением входных цепей приемника.

На микросхеме DA1 реализован усилитель с программируемым коэффициентом усиления (PGA). Его коэффициент усиления может устанавливаться равным 1/2/4/8/16/32 по сигналам шины SPI, поступающим от управляющего микроконтроллера приемника. Усиление каскада устанавливается динамически в зависимости от уровня поступающего сигнала. Важно помнить, что данный каскад должен усиливать колебания с амплитудной модуляцией. Любые искажения модулированного сигнала приводят к искажению формы сигнала на выходе амплитудного детектора, что дает, в конечном счете, дополнительную ошибку определения разности фаз. На микросхеме DA5 собрано устройство формирования опорного напряжения 2,5 В, необходимое для нормальной работы PGA.

На микросхеме DA3A реализован масштабный усилитель. Поскольку рабочая частота усиления относительно высокая, лежит в ультразвуковой области частот, то к микросхеме данного каскада усиления предъявляются повышенные требования к ее частотным свойствам. Микросхема OPA2192 решает это проблему должным образом.

На микросхемах DA3B и DA4B реализован линейный амплитудный детектор с высокой линейностью преобразования. Диапазон амплитуд сигнала выпрямления составляет от 1 мВ до 10 В. Линейность выпрямления сохраняется во всем динамическом диапазоне. К частотным свойствам микросхем данного каскада также предъявляются повышенные требования.

На микросхеме DA4A собран классический фильтр нижних частот второго порядка. Частота среза фильтра составляет около 2 кГц. Сигнал с частотой 30 кГц подавляется на 53 дБ. Этого более чем достаточно для нормальной работы всех остальных каскадов приемного акустического блока системы

измерения дальности. Амплитудно-частотная характеристика данного ФНЧ, полученная в среде проектирования Micro-Cap, показана на Рис. 5.

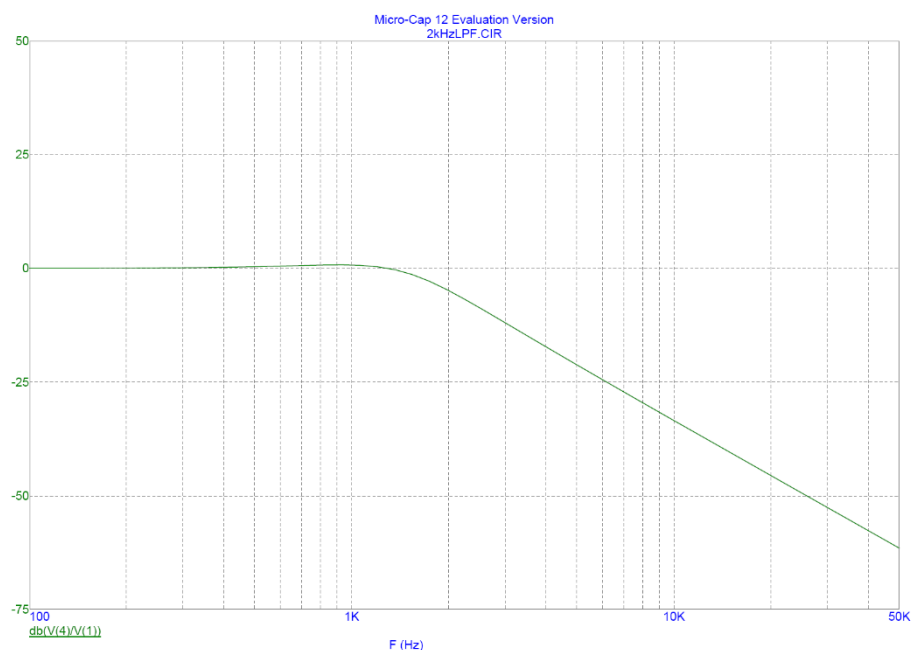


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика ФНЧ.

На Рис. 6 показана реальная осциллограмма усиленного модулированного сигнала ультразвукового диапазона, снимаемого на выходе микросхемы DA3A (по вертикали 5 В/дел).

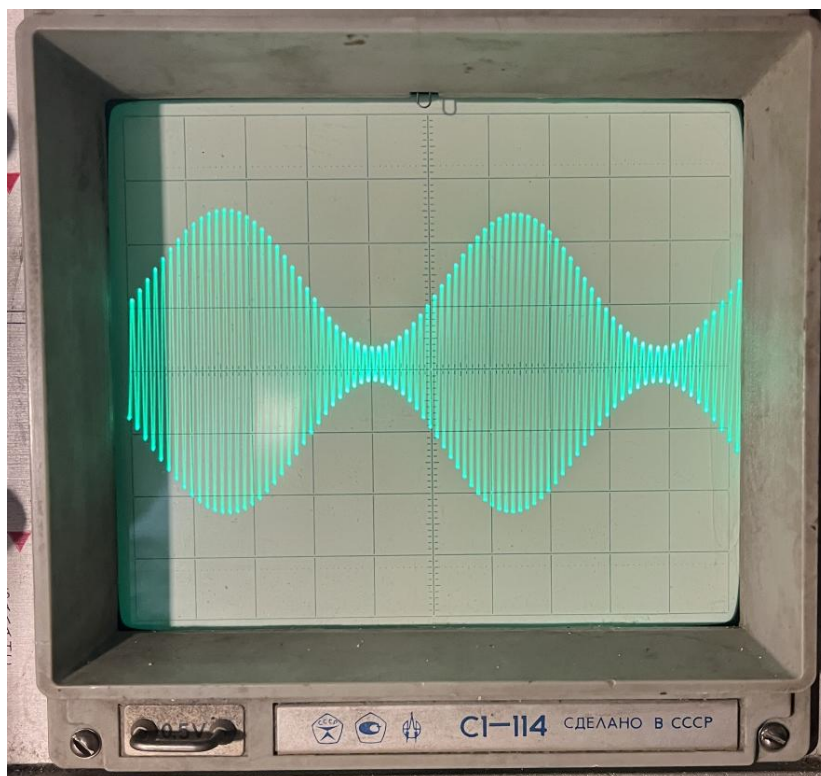


Рис. 6. Осциллограмма усиленного модулированного сигнала.

На рис. 7 показана реальная осциллограмма выпрямленного сигнала, снимаемого на выходе микросхемы DA4B (по вертикали 5 В/дел).

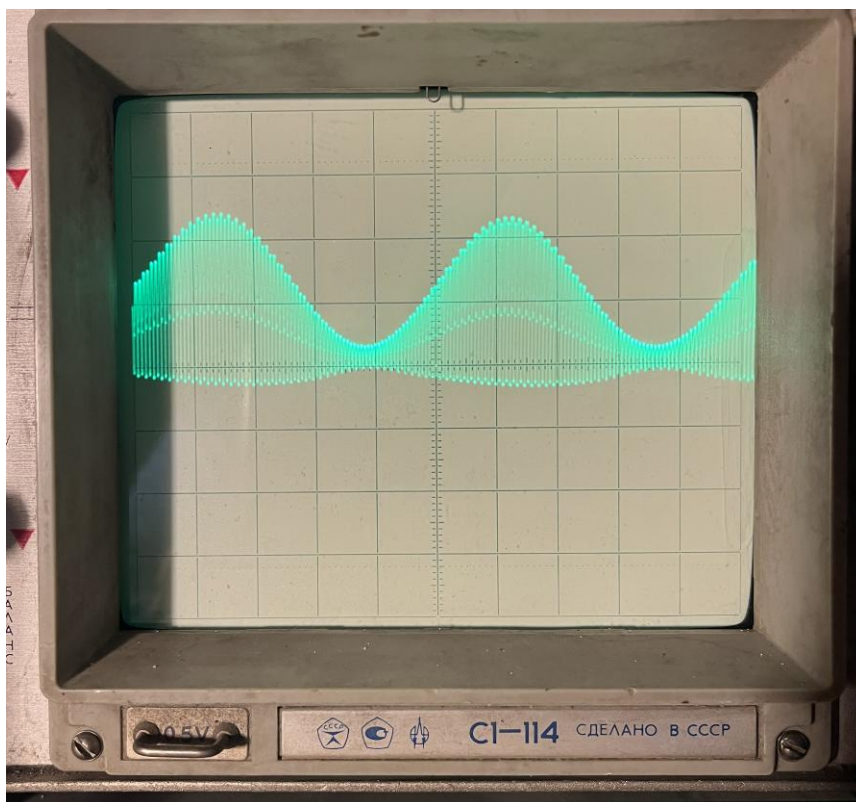


Рис. 7. Осциллограмма выпрямленного сигнала.

Осциллограмма реального сигнала на выходе ФНЧ показана на Рис. 8.

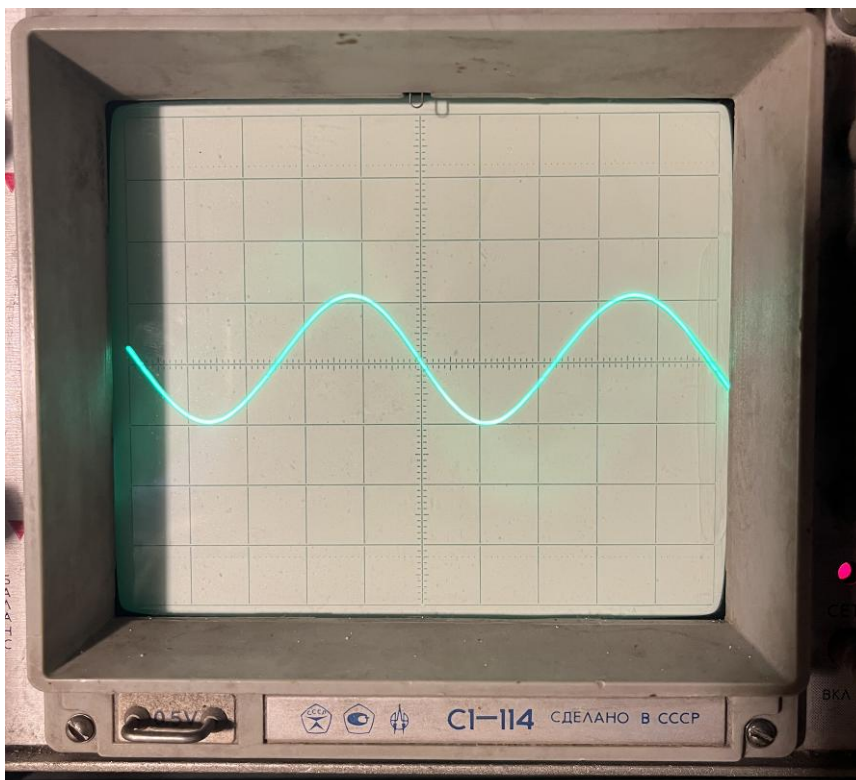


Рис. 8. Осциллограмма сигнала на выходе ФНЧ.

Как видно из приведенных реальных осциллограмм, результаты экспериментальных исследований полностью подтверждают результаты моделирования, проведенные выше.

Заключение

Таким образом, можно констатировать следующее. Использование ультразвукового рабочего диапазона в системе измерения дальности под водой позволяет существенно уменьшить массогабаритные показатели акустических преобразователей и, как следствие, всей системы измерения дальности. При использовании ультразвуковых акустических преобразователей с резонансной частотой в десятки килогерц, их габариты составляют единицы сантиметров и вес составляет десятки грам. Кроме того, и передающий и приемный акустические преобразователи всегда работают на частоте f_0 , близкой к своей резонансной, обеспечивая тем самым высокую эффективность излучения и приема ультразвуковых колебаний. При этом изменение частоты модулирующего сигнала в пределах $F_1 \dots F_2$ никак не сказывается на точности определения дальности, поскольку это изменение не связано с изменением рабочей частоты ультразвукового акустического преобразователя f_0 и дополнительный фазовый сдвиг, вносимый самим акустическим преобразователем, не сказывается на работе фазовой системы измерения дальности. Это сдвиг фаз, равно как и набег фазы ультразвуковых колебаний за счет распространения гидроакустических волн, полностью подавляется в процессе демодуляции сигналов на приемной стороне.

Вместе с тем, основные технические показатели системы измерения дальности под водой определяются частотой основных информационных колебаний системы, которая лежит в звуковом диапазоне длин волн. Реальное значение частоты основных информационных колебаний составляет 1 кГц и при измерении дальности до 100 м изменяется до величины 1015 Гц. На меньших дальностях для повышения точности системы возможно увеличение изменения частоты вплоть до 2 кГц.

Ультразвуковые сигналы используются исключительно как несущие колебания, обеспечивая нормальные режимы работы акустических преобразователей системы. Одновременно с этим происходит снижение массогабаритных показателей системы. Данный факт позволяет устанавливать систему на объекты любых классов, дальность которых необходимо измерить. Кроме этого, точность измерения дальности при использовании данного подхода будет выше, поскольку изменение частоты сигнала звукового диапазона ($F_1 - F_2$) не будет давать дополнительную ошибку измерения разности фаз, и, как следствие, ошибку определения дальности, обусловленные резонансной природой самих акустических преобразователей. Акустические преобразователи всегда работают на одной рабочей частоте, близкой к их резонансной, что, с другой стороны, обеспечивает высокую эффективность работы самих акустических преобразователей.

Финансирование: Данная работа была выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект 24-29-20009.

Литература

1. Инзарцев А.В. и др. Мониторинг морского дна с применением технологий интеллектуальной обработки данных поисковых устройств на борту автономного необитаемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. – 2015. – №. 2. – С. 20-27.
2. Naugaløkken B.O. A. et al. Docking stations for net-crawling underwater vehicles in aquaculture net pens // OCEANS 2021: San Diego–Porto. – IEEE, 2021. – С. 1-10.
3. Агеев М.Д. и др. Автоматические подводные аппараты. – 1981.
4. Агеев М.Д. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. – 2005.

5. Ляхов Д.Г., Смирнов С.В., Чудаков М.И. О применении необитаемых подводных аппаратов в морской нефтегазодобывающей отрасли // Подводные исследования и робототехника. – 2013. – №. 1. – С. 23-32.
6. Peña F.L., Orjales F., Deibe A. Development of a collaborative host-guest unmanned underwater vehicle docking system for inspection and maintenance of offshore structures // OCEANS 2023-MTS/IEEE US Gulf Coast. – IEEE, 2023. – С. 1-5.
7. Shirokova E.I., Shirokov I.B. Positioning Autonomous Underwater Vehicles at its Moving and Berthing // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – IEEE, 2023. – С. 444-447.
8. Shirokov I.B., Shirokova E.I., Kosarev N.A. Distance Measuring Under Water // 2024 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA). – IEEE, 2024. – С. 1-4.
9. Shirokov I.B., Shirokova E.I., Kosarev N.A. Distance Measurement Under Water // 2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC). – IEEE, 2024. – С. 58-61.

Для цитирования:

Широков И.Б., Широкова Е.И., Косарев Н.А. Улучшение эксплуатационных характеристик системы измерения дальности под водой // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.25>